白蜡吉丁肿腿蜂的生物学和生态学特性及繁殖技术研究

武 辉[1,2],王小艺[1],李孟楼[2],杨忠岐[1,*],曾繁喜[3],
王红艳[3],白 玲[3],刘松君[3],孙 进[3]

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所,国家林业局森林保护学重点实验室,北京 100091; 2. 西北农林科技大学林学院,陕西杨凌 712100; 3. 天津市官港森林公园,天津 300274)

摘要:采用室内测定并结合林间实地调查的方法,研究了新发现的寄生于蛀干害虫白蜡窄吉丁的外寄生蜂——白蜡吉丁肿腿蜂 *Sclerodermus pupariae* Yang et Yao 的生物学特性及其人工繁殖技术。结果表明,白蜡吉丁肿腿蜂外寄生于白蜡窄吉丁的幼虫和蛹及预蛹,是自然控制该害虫的一种重要寄生蜂,自然寄生率为 13.9% 左右。该蜂在天津 1 年发生 5 代,世代重叠明显,寿命长。白蜡吉丁肿腿蜂的卵、幼虫、茧蛹期和全世代的发育起点温度分别为 (16.89 ± 0.79)℃,(17.03 ± 1.42)℃,(16.90 ± 1.68)℃和(15.31 ± 0.47)℃。有效积温分别为(33.82 ± 4.13)日·度、(49.11 ± 7.93)日·度、(128.88 ± 27.87)日·度和(277.00 ± 14.15)日·度。雌性成蜂易于低温保存,对寄主有较强的搜索力和攻击力。繁蜂寄主容易大量获得,是生物防治白蜡窄吉丁的重要理想天敌之一。

关键词:白蜡吉丁肿腿蜂;白蜡窄吉丁;生物学特性;生物防治;人工繁殖

中图分类号:Q965 **文献标识码**:A **文章编号**:0454-6296(2008)01-0046-09

Biology and mass rearing of *Sclerodermus pupariae* Yang *et* Yao (Hymenoptera: Bethylidae), an important ectoparasitoid of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) in China

WU Hui[1,2], WANG Xiao-Yi[2], LI Meng-Lou[1], YANG Zhong-Qi[2,*], ZENG Fan-Xi[3], WANG Hong-Yan[3], BAI Ling[3], LIU Song-Jun[3], SUN Jin[3] (1. The Key Laboratory of Forest Protection, State Forestry Administration of China, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Guangang Forest Park, Tianjin 300274, China)

Abstract: The biology and mass rearing technique of a newly discovered ectoparasitoid *Sclerodermus pupariae* Yang *et* Yao were studied by laboratory determination combined with field investigation. The results indicated that *S. pupariae* is an important ecto-parasitoid of prepupa, pupa and larva of emerald ash borer (EAB), *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae), with the natural parasitic rate as high as about 10%. The wasp has five generations per year in Tianjin, with generations overlapping heavily. The life spane of the wasp adults was about a month with high fecundity, and could oviposit several times. The experiment showed that the development threshold temperature for its egg, larva, pupa and the whole generation were 16.89℃ ± 0.79℃, 17.03℃ ± 1.42℃, 16.90℃ ± 1.68℃ and 15.31℃ ± 0.47℃, respectively. The effective accumulated temperatures for those stages were (33.82 ± 4.13) degree-day, (49.11 ± 7.93) degree-day, (128.88 ± 27.87) degree-day and (277.00 ± 14.15) degree-day, respectively. The female wasps could be stored under low temperature safely without influence on their host-searching and host-attacking abilities. The substitute hosts for mass rearing of the parasitoid can be obtained easily. Thus, it could be used as an

---

基金项目:国家'十一五'科技支撑计划(2006BAD08A12);美国农业部动植物检疫局和林务局项目

作者简介:武辉,男,1980 年生,硕士,现工作单位在长春市净月潭北方绿化中心,研究方向为害虫生物防治,E-mail: wuhui0821@tom.com

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: yzhqi@caf.ac.cn

收稿日期 Received: 2007-05-23;接受日期 Accepted: 2007-07-27

important natural enemy for the biological control of the buprestid pest.

Key words: *Sclerodermus pupariae*; *Agrilus planipennis*; biology; biological control; effective accumulated temperature; mass rearing

白蜡窄吉丁 *Agrilus planipennis* Fairmaire（鞘翅目：吉丁甲科）是白蜡属（*Franxinus* spp.）树木的重要蛀干害虫，目前在国内部分地区发生较重（Wei *et al*.，2004；赵同海等，2005），在美国则成为危害森林的头号重大外来有害生物（Haack，2002）；2005 年被列为北京市危险性森林植物检疫对象。其幼虫在韧皮部和木质部浅层蛀食，危害极其隐蔽，常规防治方法很难发挥作用，生物防治是值得优先考虑的策略。

在调查白蜡窄吉丁的天敌中，我们发现了一种寄生于白蜡窄吉丁的肿腿蜂，经研究确定为一新种——白蜡吉丁肿腿蜂 *Sclerodermus pupariae* Yang *et* Yao（膜翅目：肿腿蜂科 Bethylidae）（王小艺，2005）。该蜂最初发现于天津官港森林公园，外寄生于白蜡窄吉丁的预蛹和蛹。经调查，2006 年该蜂在林间的自然寄生率为 10%左右。后经野外观查和室内试验发现，它也能寄生白蜡窄吉丁的各龄幼虫。白蜡吉丁肿腿蜂对寄主有较强的搜索和主动攻击能力，是白蜡窄吉丁的一种重要的蛹期寄生蜂。如人工繁殖后释放，可望在白蜡窄吉丁的生物防治上发挥重要作用（杨忠岐，2004）。为此，我们于对该蜂的生物学特性和生态学进行了研究，现将结果报道如下。

1　材料与方法

1.1　白蜡吉丁肿腿蜂来源

2006 年 4～5 月，在天津市官港森林公园白蜡林内采集越冬代肿腿蜂成蜂，带回公园实验室，室温下接入白蜡窄吉丁预蛹或蛹，进行人工繁殖。

1.2　白蜡吉丁肿腿蜂的形态特征观察

在带有显微刻度的‘Motic’双目解剖镜下仔细观察白蜡吉丁肿腿蜂各虫态的形态特征，并测量有关形态数据。

1.3　白蜡吉丁肿腿蜂的生物学特性

1.3.1　自然寄生率调查：2006 年 5 月上中旬，在天津官港人工白蜡林地中随机调查白蜡窄吉丁的发育进度，统计被白蜡吉丁肿腿蜂寄生的白蜡窄吉丁的数量。实验林地约 5 hm^2，每组调查不少于 30 头寄主。

1.3.2　寄主范围和对寄主大小的选择性测定：在肿腿蜂发生地附近，寻找常见的害虫以及从外地采集部分寄主，在室温下测定。供试寄主有白蜡窄吉丁、合欢吉丁 *Agrilus viduus* Kerremans、苹果小吉丁 *Agrilus mali* Matsumara、花椒窄吉丁 *Agrilus zanthoxylumi* Hou、核桃小吉丁 *Agrilus lewisiellus* Kerremans、麻天牛 *Falderman gebleri*（Falderman）、黄粉虫 *Tenebrio molitor*（L.）、光肩星天牛 *Anoplophohora glabripennis*（Motschulsky）、芦螟 *Chilo luteellus*（Motschulsky）、苍耳螟 *Oatrinia orientalis*（Mutuura *et* Munroe）、小线角木蠹蛾 *Holcocerus insularis* Staudinger、美国白蛾 *Hyphantria cunea*（Drury）、槐尺蠖 *Semiothisa cinerearia* Bremer *et* Grey、复纹狭天牛 *Stenhomalus complicates* Gressitt 幼虫和一种苹果天牛幼虫。参照周祖基等（1997）的方法，把供试寄主和 1～2 头肿腿蜂接入试管中，用脱脂棉塞紧管口，观察其能否被寄生。

1.3.3　寿命、雌雄性比和雌性有翅率：肿腿蜂羽化后，统计雌雄蜂和雌性具翅蜂的数量。在不补充任何营养、只补充水分、补充 20%的蜂蜜水的情况下，统计成蜂存活的天数。

1.3.4　孤雌生殖：将未经过交配的雌性肿腿蜂放入试管中，接入白蜡窄吉丁蛹，脱脂棉塞好管口。观察其能否产卵、孵化以及后代的性别。重复 5 次。

1.3.5　耐水性、向性和扩散速度测定：在 26℃～27℃的条件下，在直径为 8 cm 的培养皿中盛 5 mm 厚的水层，把羽化 1 周内的雌性肿腿蜂用毛笔接入水中，不让其逃出水面。1 h 后取出观察其活动能力；在石蜡表面滴几滴纯净水，使水呈球形，将肿腿蜂接在水球上，观察其摆脱水的表面张力的能力。各重复 5 次。分别在 18.9℃，22.2℃和 27.3℃的条件下，将直径为 1.5 cm 的竹竿竖直放置，把肿腿蜂接在竹竿上，让其自由向上爬行，测量爬行过的距离和所用时间，取速度的平均值（周祖基等，1996）。每个温度下重复 6 次。

1.4　肿腿蜂的年生活史

2006 年 4 月下旬至 5 月中旬，在天津官港采集越冬代肿腿蜂带回室内作为蜂种，以白蜡窄吉丁蛹为寄主，在自然变温条件下繁殖 F_1 代及其姊妹代，然后用 F_1 代作雌蜂繁殖子 F_2 代，以此类推进行繁殖，直到室内的温度不适宜肿腿蜂繁殖为止。

1.5　肿腿蜂各虫态的发育起点温度和有效积温

2006年4月中旬至11月中旬，每天在室内(7:00，12:00，18:00，23:00)和室外(7:30，12:00，14:30，18:30)用数字温度仪4次记录温湿度值，测量的平均值作为当天室内、外的温湿度值。

每天4次记录室内的温度变化，取其平均值作为当天的发育温度。各个虫态发育期间温度的平均值作为发育历期的发育温度。在'Motic'双目解剖镜下每天3次(8:00，14:30，23:00)观察各虫态发育进程，并详细记录各虫态的发育历期。用'最小二乘法'计算有效积温和发育起点温度(南京农学院，1985)。

1.6 白蜡吉丁肿腿蜂的人工繁殖

在(25±1)℃和相对湿度为70%～80%的条件下，将交配过的雌性肿腿蜂接入1.5 cm×11.0 cm规格的试管中，接入白蜡窄吉丁蛹或幼虫，脱脂棉塞好管口。观察产卵、孵化、羽化情况，并进行详细统计。

1.7 低温贮藏对白蜡吉丁肿腿蜂茧的羽化和成蜂寿命及繁殖的影响

将羽化后3天的F_1代成蜂，于2006年6月23日贮存在(8±2)℃的冰箱中，9月8日取出，逐步升温至25℃，使其恢复活动状态，检查死亡的数量。然后把单头雌蜂接入白蜡吉丁幼虫进行繁殖。

将羽化后3天的F_2代成蜂，于2006年7月25日贮存在(8±2)℃的冰箱中，10月2日取出，逐步升温后，检查雌蜂的死亡数量。

1.8 肿腿蜂对接入木段内的白蜡窄吉丁幼虫的搜索和寄生能力

把直径为1.5 cm左右的白蜡枝条截成约10 cm长，剖开枝条接入1头白蜡窄吉丁4龄幼虫，枝条两端用橡皮筋绑好，不留缝隙，然后两端封蜡，防止过早失水。将做好的带虫枝条放入3.0 cm×11.5 cm规格的大玻璃试管中，各接入雌性肿腿蜂2头，用脱脂棉塞紧管口。在室温(24℃±1℃和RH 75%)下观察雌蜂对寄主的搜索和攻击。重复20次。

1.9 数据的统计分析

本研究所有数据的统计分析均采用SAS软件包(8.2)进行(陈子星和徐夕水，1997)。

2 结果与分析

2.1 形态特征

白蜡吉丁肿腿蜂成虫形似蚂蚁，性二型显著。雄性具翅，体小，长约为2.5 mm。雌性部分有翅，体较雄性为大，长约4.0 mm。翅与腹末齐平，体青铜色，触角比体短，肘状，13节，约为体长的1/3。头黑褐色方形。腹部背面可见7节，3～7腹节两侧和产卵管末端有黄色刚毛。腹面各节之间有黄色长毛和短绒毛。前足腿节膨大，各足胫节上有一端距，中足胫节外侧被短黄毛。

幼虫蛆型，乳白色，老熟后体长2.1 mm左右，宽0.65 mm左右。茧丝质、致密、长椭圆型，结茧初期为白色，后期变为黄褐色。成蜂羽化时在端部或靠近端部的地方咬直径为0.9 mm左右的不规则圆形羽化孔。卵乳白色半透明，长椭圆型，一端略大。卵粒长约0.5 mm、宽约0.2 mm。孵化前失去光泽，有的卵色略微变黄。

2.2 生物学特性

2.2.1 自然寄生率：2006年5月1～12日，在白蜡林地中进行了8次调查，共调查到白蜡窄吉丁预蛹和蛹115例，其中找到已经被寄生和正在寄主蛹室周围的虫粪道内搜索的白蜡吉丁肿腿蜂29头，其中16头被寄生，寄生率为13.9%。

2.2.2 寄主范围和对寄主大小的选择性测定：2006年6～10月，采集白蜡吉丁肿腿蜂用不同寄主进行繁殖试验。发现能被肿腿蜂寄生、取食、而且其后代发育正常的寄主有：白蜡窄吉丁各龄幼虫、合欢吉丁幼虫、苹果小吉丁幼虫和蛹、花椒窄吉丁幼虫、核桃窄吉丁幼虫、麻天牛幼虫、黄粉虫蛹、光肩星天牛低龄幼虫、芦螟幼虫和蛹、复纹狭天牛幼虫及一种苹果天牛幼虫。不能寄生、取食和产卵的有：苍耳螟幼虫、美国白蛾各龄幼虫、槐尺蛾幼虫、小线角木蠹蛾幼虫。试验表明，该蜂对寄主的大小没有选择性，但能根据寄主的大小来决定产卵的数量，会充分利用寄主营养。

在测定中发现，寄主若具备活动敏捷、能快速吐丝、体形过大、体表多毛、较硬和体内含水量高之中的任何一种情形，都会对肿腿蜂的寄生造成很大困难，甚至可能会造成蜂的死亡。这也成为筛选该蜂繁殖寄主的主要标准之一。

2.2.3 性比、寿命和雌性有翅率：白蜡吉丁肿腿蜂一次完整的产卵寄生所繁殖的后代中，其雄性的数量为0～4头，但以1～2头为主，极罕见可达6头，其余的全部为雌性个体。雌雄性个体的比例能达到19～49:1。在(25±1)℃的温度条件下，雌蜂羽化后补充20%蜂蜜水与只补充水分和不给任何补充的处理间($df=2,193$，$F=13.0230$，$P=0.0001$)存在显著性差异。这可能是多次加蜂蜜水后粘性较大，影响了成蜂的寿命。但繁殖中观察，雌蜂在补充白蜡

窄吉丁蛹或幼虫体液的情况下平均寿命明显增加，可达 60 天以上。雄性个体平均寿命约 12 天(表 1)。

表 1　白蜡吉丁肿腿蜂在不同营养条件下的寿命

Table 1　The longevity of *Sclerodermus pupariae* under different nutritional condition

性别 Sex	处理 Treatment	观察数(头) Number of individuals observed	变幅(d) Var.(d)	平均寿命 ± *SE*(d) Average longevity ± *SE*
♀ Female	补充 20%蜂蜜水 Supplying 20% honey solution	81	15.7 ~ 37.7	25.96 ± 0.52 b B
	只补充水分 Only supplying water	55	18.7 ~ 50.7	31.26 ± 1.24 a A
	不补充 Supplying nothing	60	19.7 ~ 33.7	27.38 ± 0.43 b B
♂ Male	不补充 Supplying nothing	40	4.7 ~ 16.7	12.43 ± 0.35

小写字母表示 5% 显著水平，大写字母表示 1% 极显著水平。下同。Small and capital letters mean significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively. The same below.

白蜡吉丁肿腿蜂第 1 代雌性个体的有翅率最高可达 56.6%，第 2 代开始有翅率明显减少，雌雄比增大(表 2)。这种现象可能与温度和环境的变化有关，因为越冬代产卵时自然界温度仍然偏低，而且从试验得知，第 1 代的平均出蜂量总体上少于后几代(图 2)。可能该蜂为了提高扩散能力和交配的有效性，形成了高有翅率和低雌雄性比的生态策略。

2.2.4　孤雌生殖：用白蜡窄吉丁幼虫或蛹作寄主，接入单头未经过交配的雌性肿腿蜂繁殖，重复 3 次。结果表明，未交配的雌蜂接触寄主来补充营养的时间都会推迟，约 10 ~ 14 天才开始产卵，但产卵后幼虫的孵化、生长正常，3 个重复共羽化出 100 头左右的子代成蜂，全部为雄性。表明肿腿蜂在无雄蜂时也能孤雌生殖，但后代全部为雄性。

表 2　白蜡吉丁肿腿蜂各代雌性个体的有翅率和性比

Table 2　The alate rate and sex ratio of female *Sclerodermus pupariae* in different generations

世代 Generation	雌蜂数(头) Female number	雄蜂数(头) Male number	雌性有翅数(头) Female alate number	有翅率(%) Alate rate	♀∶♂ Sex ratio
F_1	378	20	214	56.6	18.9∶1
F_2	468	14	69	14.7	33.4∶1
F_3	198	4	0	0	49.5∶1
F_4	292	7	0	0	41.7∶1
F_5	427	10	0	0	42.7∶1

2.2.5　耐水性和扩散速度测定：供试雌蜂刚放入水中时剧烈的挣扎，企图逃脱，约半小时后活动渐弱而漂浮在水面不动。耐水性试验结果表明，肿腿蜂无论是有翅还是无翅个体都能耐 1 h 的清水浸泡。之后用毛笔尖挑出，成蜂即刻可以爬行，3 ~ 5 min 后行动自如，完全恢复到原来的状态。接在圆形水滴上的雌蜂能在 2 s 内迅速的逃离，水滴的表面张力对肿腿蜂几乎不能起到任何的阻碍作用。可见该蜂在自然界对降雨具有很强的适应能力。

为了解白蜡吉丁肿腿蜂的扩散能力，用竹竿在室内进行了测定，即将成蜂放在竹竿表面，让其爬行，观察其爬行距离。从图 1 可以看出，该蜂自然扩

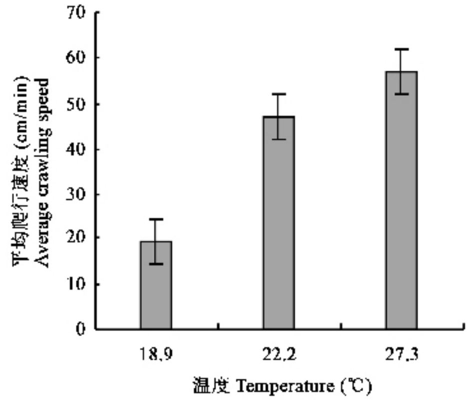

图 1　白蜡吉丁肿腿蜂的扩散速度与温度的关系

Fig. 1　The relationship between dispersal speed and temperature of *Sclerodermus pupariae*

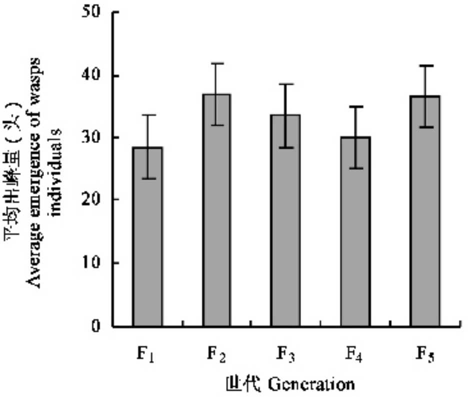

图 2　白蜡吉丁肿腿蜂各代的平均出蜂量

Fig. 2　The average emergence number of *Sclerodermus pupariae* in different generations

散能力较强，在湿度为 70% 左右的情况下，随着温度的升高，活动能力明显增强。18.9℃时的爬行速度仅为 19.0 cm/min，在 27.3℃时速度为 56.9 cm/min，提高了 3 倍。可见温度是影响其扩散速度的决定性因素。但是竹竿较光滑，在自然情况下由于树皮较粗糙，搜索和扩散的速度可能会有所降低。

2.3 白蜡吉丁肿腿蜂的年生活史

白蜡吉丁肿腿蜂以经过交配的雌性成蜂在寄主虫道、蛹室或其它隐蔽的地方越冬，部分越冬代能活到第 2 年的 7～8 月，可以产卵 3～5 次。经过连续几年的野外林间调查，该蜂在天津官港地区随气候的变化，活动时间为每年的 4 月中下旬至 10 月中下旬或 11 月上旬。2006 年我们在室内变温条件下进行了人工繁育，认为该蜂能完成 5 个世代的发育(表 3)，每代有 3～5 个姊妹代。但是在自然界由于有较长时间的搜索和补充营养过程，不一定都能真正发生 5 代。该蜂在补充寄主体液后寿命很长，因此世代重叠非常严重。

表 3 2006 年白蜡吉丁肿腿蜂的年生活史(天津官港)

Table 3 The life history of *Sclerodermus pupariae* in 2006 (Guangang, Tianjin)

代数/虫态 Generation/Stage		4月 April			5月 May			6月 June			7月 July			8月 August			9月 September			10月 October			11月 November		
		上 F	中 M	下 L	上 F	中 M	下 L	上 F	中 M	下 L	上 F	中 M	下 L	上 F	中 M	下 L	上 F	中 M	下 L	上 F	中 M	下 L	上 F	中 M	下 L
越冬成虫 Overwintering adult		(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)		(+)	(+)									
第 1 代 1st generation	卵 Egg				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●											
	幼虫 Larva					–	–	–	–	–	–	–	–	–											
	蛹 Pupa						△	△	△	△	△	△	△	△	△										
	成虫 Adult							+	+	+	+	+	+	+	+	+	+								
第 2 代 2nd generation	卵 Egg								●	●	●	●	●	●	●	●	●								
	幼虫 Larva									–	–	–	–	–	–	–	–	–							
	蛹 Pupa									△	△	△	△	△	△	△	△	△	△						
	成虫 Adult											+	+	+	+	+	+	+	+	+	+				
第 3 代 3rd generation	卵 Egg											●	●	●	●	●	●	●	●	●					
	幼虫 Larva												–	–	–	–	–	–	–	–					
	蛹 Pupa												△	△	△	△	△	△	△	△	△				
	成虫 Adult														+	+	+	+	+	+	+	+	+		
第 4 代 4th generation	卵 Egg														●	●	●	●	●	●	●	●			
	幼虫 Larva															–	–	–	–	–	–	–			
	蛹 Pupa																△	△	△	△	△	△	△		
	成虫 Adult																	+	+	+	+	+	(+)	(+)	(+)
第 5 代 5th generation	卵 Egg																	●	●	●	●	●			
	幼虫 Larva																		–	–	–	–			
	蛹 Pupa																			△	△	△	△		
	成虫 Adult																					(+)	(+)	(+)	(+)

●：卵 Egg；–：幼虫 Larva；△：蛹 Pupa；+：成虫 Adult；(+)：越冬成虫 Overwintering adult. F：上旬 The first ten days of the month；M：中旬 The middle ten days of the month；L：下旬 The last ten days of the month.

2.4 发育起点温度和有效积温

2.4.1 白蜡窄吉丁各虫态的发育起点温度和有效积温

将林间采集的白蜡吉丁肿腿蜂在室内变温条件下用白蜡窄吉丁的蛹进行饲养，统计各虫态和全世代的发育天数，共记录 7 个重复作为计算的依据。结果显示，在试验温度范围内，白蜡吉丁肿腿蜂的发育历期随温度的升高而逐渐递减，温度对卵、幼虫、茧蛹期的发育进程的影响极其明显，但在 20℃～22℃的范围内发育历期变化的不明显(表 4)。用公式分别求得白蜡吉丁肿腿蜂的卵、幼虫、茧蛹期和全世代的发育起点温度分别为(16.89 ± 0.79)℃、(17.03 ± 1.42)℃、(16.90 ± 1.68)℃和(15.31 ± 0.47)℃。有效积温分别为(33.82 ± 4.13)日·度、(49.11 ± 7.93)日·度、(128.88 ± 27.87)日·度和(277.00 ± 14.15)日·度，并进一步求出了其线性回归方程和相关系数(表 5)。根据天津大港区 20 年的月平均气温资料(大港区志，1991)，结合室外自测的温度值计算得知当年该地区全年大于 15.31℃的有效积温为 1 311.9 日·度。以全世代所需有效积温预测每年可发生 4.74 代。这与室内实际饲养可繁殖的 5 代基本的结论基本上接近。由表 2 的结论可以指导室内人工控温条件下大规模繁殖白蜡吉丁肿

腿蜂，其发育历期与温度的关系式为：

$$T = \frac{277.00}{N} + 15.31 \quad 或 \quad N = \frac{277.00}{T - 15.31}$$

若要 30 天内繁殖此蜂来林间释放，可以求出繁殖所需要的温度为 24.5℃。当然，由于该蜂在此温度下必须补充寄主体液 3～5 天才能产卵，在实际操作时应该把这段时间也考虑在内。

2.4.2　温度与白蜡吉丁肿腿蜂发育的关系：利用单一的直线回归求出的预测式，有时与实际情况的符合程度存在一定的差异，因为即使是在适宜温度范围内，昆虫的发育历期也并非总是随温度的升高而呈线性递减。为了进一步清楚温度与白蜡吉丁肿腿蜂发育的关系，需进一步用非线性的回归方法进行拟合（杨忠岐，2000；周祥等，2006）。根据实际我们选择指数方程 $y = a \cdot e^{bx}$，建立数学模型，其中 y 为发育历期，x 为温度。经计算得 a = 445.25，b = －0.1096，F = 241.79，查 F 值检验表(2,6) = 5.14，由于 $F >> F$ 临界值，拟合的指数曲线模型（图 3）极显著。完全可以利用该指数模型计算白蜡吉丁肿腿蜂发育的理论历期，从而可以得出比较符合实际的曲线图（图 4）。

表 4　白蜡吉丁肿腿蜂各虫态在室内自然变温下的历期和发育速率

Table 4　The developmental duration and developmental rate of *Sclerodermus pupariae* at different stages under natural conditions

供试组编号 Group no.	卵期 Egg stage			幼虫期 Larval stage			茧蛹期 Pupal stage			全世代 One generation		
	T (℃)	N (d)	V	T (℃)	N (d)	V	T (℃)	N (d)	V	T	N (d)	V
1	20.6	8.7	0.1149	20.6	10.7	0.0935	21.6	25.0	0.0400	22.55	38.0	0.0263
2	20.8	8.0	0.1250	21.5	9.7	0.1030	22.0	21.3	0.0469	23.21	35.3	0.0283
3	21.2	7.0	0.1429	25.6	7.3	0.1370	24.8	19.0	0.0526	23.35	34.7	0.0288
4	21.7	6.0	0.1667	26.0	6.0	0.1667	25.2	16.7	0.0599	24.45	29.0	0.0345
5	23.4	5.3	0.1887	25.8	5.7	0.1754	26.0	15.0	0.0667	25.60	27.0	0.0370
6	25.5	4.3	0.2326	26.8	5.0	0.2000	26.1	14.0	0.0714	25.75	26.7	0.0375
7	26.3	3.3	0.3030	26.3	4.7	0.2128	26.2	12.7	0.0787	26.29	25.3	0.0395

T：实际温度 The actual temperature；N：发育历期 Developmental duration；V：发育速率 The developmental rate.

表 5　白蜡吉丁肿腿蜂各虫态的发育起点温度和有效积温

Table 5　The development threshold temperature and effective accumulated temperatures of *S. pupariae*

虫态 Stage	发育起点温度(℃) Development threshold temperature $C \pm SE$	有效积温(日·度) Effective accumulated temperature $K \pm SE$	回归式 Regression equation	相关系数 r Correlative coefficient (r)	F 值 Value F	直线显著水平 Significance level of equation (P)
卵 Egg	16.89 ± 0.79	33.82 ± 4.13	$T = 16.89 + 33.82V$	0.9704	80.87	0.0003
幼虫 Larva	17.02 ± 1.42	49.11 ± 7.93	$T = 17.02 + 49.11V$	0.9051	22.67	0.0051
茧蛹 Pupa	16.89 ± 1.68	128.87 ± 27.87	$T = 16.89 + 128.87V$	0.9168	26.34	0.0037
全世代 One generation	15.31 ± 0.47	277.00 ± 14.15	$T = 15.31 + 277.00V$	0.9928	344.0	0.00001

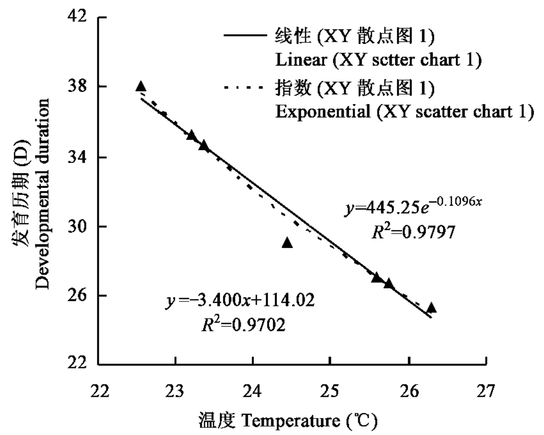

图 3　白蜡吉丁肿腿蜂发育历期与温度的关系

Fig. 3　Relationship between developmental duration of *Sclerodermus pupariae* and temperature

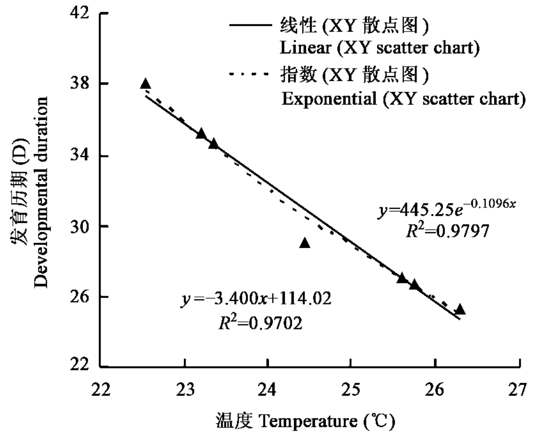

图 4　白蜡吉丁肿腿蜂的发育历期理论值与温度的关系

Fig. 4　Relationship between theoretical developmental duration of *Sclerodermus pupariae* and temperature

2.5 白蜡吉丁肿腿蜂的人工繁殖

2.5.1 白蜡吉丁肿腿蜂产卵及各代的第一个姊妹代平均出蜂量比较：白蜡吉丁肿腿蜂一生可产卵 3 ~ 5 次，甚至更多。在室内单头雌蜂繁殖的情况下，部分雌蜂从第 3 个姊妹代开始全为雄性。说明经过受精的卵已经全部产完，以后产的是未受精的卵。但在自然界雌蜂可能还会与子代有交尾的机会。用白蜡吉丁蛹作寄主对该蜂各代的第 1 个姊妹代平均出蜂量作了统计，在 5 个世代共 54 次繁殖中，每头雌蜂繁殖子代平均为(32.9 ± 1.2)头，变幅为 13 ~ 57 头，具体各代平均出蜂量见图 2。即使卵的孵化和茧的羽化会造成的一定的损失，可以推测每头雌蜂一生仍可直接繁殖 99 ~ 165 头子蜂。

2.5.2 两种接蜂方法对子代的影响：由表 6 知，单头寄主接 1 头和 2 头雌蜂的出蜂量存在显著差异(df = 1，18，F = 7.1040，P = 0.0158)，但是接 2 头雌蜂的每头平均只能出 21.7 头子蜂。故在实际操作中可根据蜂种和寄主的丰富程度来选择合适的繁殖方法。另外发现，1 头寄主不论接几头雌蜂，子代中雄性个体数量一般都为 1 ~ 2 头，可见该蜂可以控制后代的雄性数量。

表 6 两种繁殖方法对出蜂量和性比的影响

Table 6 Effects of two rearing methods on wasp production and sex ratio

寄主 Host	接入雌蜂(头) Female wasp	出蜂(头)(± *SE*) Offspring number (± *SE*)	雌/出蜂(头) Female/emergence wasps	♀:♂ Sex ratio	重复 *n*
白蜡窄吉丁蛹 Pupa of *S. pupariae*	1	33.6 ± 2.8 a A	33.6	32.5:1	10
白蜡窄吉丁蛹 Pupa of *S. pupariae*	2	43.4 ± 2.3 b A	21.7	42.4:1	10

2.5.3 酒精处理寄主对后代出蜂量和性比的影响：把寄主在 75% 的酒精中蘸约 30 s，用吸水纸吸干后装入试管中，接入雌蜂。与对照相比，其后代无论在幼虫量和平均出蜂上都没有明显的差异(df = 1，18，F = 1.2990，P = 0.2694)。但雌性有翅率和雌雄性比则有较大的变化(表 7)。

表 7 不同方法处理寄主对后代的影响

Table 7 Effects of different treatments on the offspring

寄主 Host	虫龄 Instar	寄主处理 Host treatment	幼虫(头)(± *SE*) Larva number (± *SE*)	平均出蜂(头)(± *SE*) Average emergence (± *SE*)	雌性有翅(%) Female alate rate	♀:♂ Sex ration	重复 *n*
白蜡窄吉丁 EAB	4	75%酒精	42.1 ± 2.4 aA	41.3 ± 2.4 aA	29.0	44.9	10
白蜡窄吉丁 EAB	4	不处理	39.0 ± 1.9 aA	37.7 ± 2.1 aA	9.9	25.9	10

2.6 低温贮藏对白蜡吉丁肿腿蜂茧蛹的羽化和成蜂寿命及繁殖的影响

2.6.1 低温处理对蛹羽化和成蜂死亡率的影响：从表 8 中可以看出，低温对该蜂茧蛹的羽化影响很大，该蜂蜂种的保存不能用低温贮藏茧蛹法。在雌性成蜂的保存上，湿度不能过大。用 20% 蜂蜜水滴在脱脂棉球上饲喂成蜂，并以此保湿来低温贮藏，死亡率可达 30% 以上。滤纸条保湿死亡率为 5%，不保湿的情况下则全部存活(表 9)。说明成蜂低温保存的死亡率高低的关键在于湿度的调节上。雄性成蜂寿命短，不适宜低温保存。

2.6.2 低温保存雌蜂对子代的影响：经过长时间低温保存的雌蜂，其繁殖能力有所下降，这表现在出蜂的数量上(表 10)。但是其平均出蜂量仍能达到 29 头，且子代的数量无显著差异(df = 1，20，F = 0.1558，P = 2.1760)。可见低温贮藏成蜂是该蜂保存的主要方式，这为大规模生物防治提供了及时而大量的蜂种来源。

表 8 低温保存后白蜡吉丁肿腿蜂茧的羽化率

Table 8 Emergence rate of *Sclerodermus pupariae* after cold storage

虫态 Stage	茧数(头) Cocoon number	世代 Generation	贮藏温度(℃) Storage temperature	贮藏时间(d) Storage period	羽化率(%) Emerging rate
茧	34	F_1	8 ± 2	74	8.8
Cocoon	42	F_1	8 ± 2	74	0
	28	F_1	8 ± 2	74	0

2.7 肿腿蜂对接入木段的寄主白蜡窄吉丁幼虫的寄生作用

实验开始 5 ~ 7 天，肿腿蜂开始从完全闭合的白蜡枝条蛀入，具体表现是雌蜂咬 1 ~ 2 个直径为 0.8 mm 左右的小孔从木段髓心处或接有寄主的地方蛀入，将所蛀的白色的木屑大量外排。观察发现，当肿腿蜂蛀入后，白蜡窄吉丁幼虫已经向前蛀食了一段，但肿腿蜂仍能跟着白蜡窄吉丁紧实的虫粪开掘一条

表 9　低温贮存后白蜡吉丁肿腿蜂成蜂的死亡率

Table 9　Motality rate of adult wasp *Sclerodermus pupariae* after cold storage

世代 Generation	处理方法 Treatment methods	贮藏温度(℃) Storage temperature	贮藏时间(d) Storage period	贮藏前蜂(头) Wasps number before storage		贮后死亡蜂(头) Wasps number after storage		死亡率(%) Motality	
				♀	♂	♀	♂	♀	♂
F_1	20%蜂蜜水 20% honey solution	8 ± 2	78	46	1	13	1	28.3	100
F_1	滤纸保湿 Humidity	8 ± 2	78	20	2	1	2	5.0	100
F_1	20%蜂蜜水 20% honey solution	8 ± 2	78	24	2	10	2	41.7	100
F_2	不处理 No treatment	8 ± 2	71	39	1	0	1	0	100
F_2	不处理 No treatment	8 ± 2	71	34	1	0	1	0	100

表 10　第 1 代(F_1)白蜡吉丁肿腿蜂低温贮藏对其子代出蜂量和性比的影响

Table 10　Effect of low temperature treatment on the number of offspring and sex ratio of *Sclerodermus pupariae* in the 1st generation

雌蜂处理方法 Treatment methods of female wasps	处理时间(d) Treatment period	重复数(次) *n*	平均出蜂(头)(± *SE*) Average emergence wasps (± *SE*)	雌性有翅率(%) Female alate rate	♀:♂ Sex ratio
不处理 Not treated	0	14	36.9 ± 3.3 a A	14.7	33.4:1
8 ± 2℃	78	8	29.1 ± 3.8 a A	3.1	22.3:1

隧道追击，直到找到白蜡窄吉丁取食并产卵寄生，与林间调查时发现其能沿着虫道寻找寄主的现象完全一致。本试验中 85% 的木段受到该蜂的攻击，寄生率达 60%。可见白蜡吉丁肿腿蜂有很强的搜索寄主并进行主动攻击的能力，综合繁殖等方面的情况判断，该蜂是一种控制白蜡窄吉丁的一种优良的寄生蜂。

2.8　白蜡吉丁肿腿蜂的其它特性

能充分利用资源。在用黄粉甲和芦螟的蛹繁殖白蜡吉丁肿腿蜂的过程中发现，雌蜂在寄主上产卵后，若发现此寄主体表较坚硬，不适合孵化后幼虫的取食，则雌蜂会吃掉产下的卵粒，以补充营养，这可能是长期进化而来的生存策略。

刺蛰行为。肿腿蜂在取食、产卵和抚幼期间，当外界物体如镊子和毛笔等物品靠近雌蜂腹部时，它会迅速地伸出腹部的毒针进行刺哲，在一些情况下还会作出短距离的倒退追击刺蛰行为。

向上性。一般情况下该蜂会沿着物体向上爬行。当雌蜂沿着物体向下爬行时，敲击和震动该物体，蜂能很快感知到，并且改变爬行方向，向上或斜向上爬行。

光线刺激。没有产卵的雌蜂对光线较敏感，总是向黑暗和缝隙里躲避。但从准备开始产卵一直到子代化蛹期间，由于有强烈的看护和抚育子代的习性，即使对灯光的直接照射也没有明显的躲避行为，一般不会离开卵或幼虫周围。

群集性。在野外自然寄生率的调查中发现，有 1 ~ 5 头雌蜂成蜂共同寄生一头白蜡窄吉丁蛹的情况。在室内繁殖的试管中，羽化后 3 天左右的成蜂即开始聚集在滤纸下或管口的棉花塞附近，静伏不动。

3　讨论

林业蛀干害虫的严重发生是威胁我国林业生态效益的发挥和林业健康发展的重大问题。用常规方法防治蛀干害虫效果较差，由于天敌昆虫能自行寻找到在树干内坑道中危害的蛀干害虫，产卵寄生或捕食，因此，利用天敌昆虫开展生物防治被寄予厚望。但是到目前为止，真正利用于生物防治和有效控制蛀干害虫的天敌仍然不多。在我国林业蛀干害虫生物防治中，比较成功的应用于生产上防治的肿腿蜂只有管氏肿腿蜂 *Sclerodermus guani* Xiao *et* Wu 和川硬皮肿腿蜂 *Sclerodermus sichuanensis* Xiao（萧刚柔，1992；周祖基等，1997）。这两种肿腿蜂在多种天牛的防治中发挥了一定的作用。新发现的白蜡吉丁

肿腿蜂初步研究表明具备优良寄生蜂的特性,表现在其雌雄性比高、有翅率较高,这进一步增强了其扩散速度、范围和寄生的有效性;其发生期与大多数寄主相一致,能在危害初期就寄生、控制害虫;具有很强的寄主搜索和攻击能力、刺蛰麻痹寄主能力、繁殖能力和寿命长等优点。

昆虫发育起点温度和有效积温是预测害虫发生期和天敌昆虫繁育的重要前提。本文着重研究了温度对白蜡吉丁肿腿蜂发育的影响,表明发育速度与温度呈正相关且有显著的影响。该蜂各虫态的发育起点温度比较高,春天持续低温可能会对搜索寄主寄生造成一些影响。但湿度和不同寄主的本身特性对该蜂的发育有多大影响以及如何影响尚待进一步研究。

本研究是在室内自然变温条件下进行,温度没有自然界那样昼夜变化剧烈,与林间实际发育进度可能会有一些差异。由于受条件的限制,白蜡吉丁肿腿蜂各虫态发育历期的实验温度均在 20℃ ~ 27℃的范围内,温度梯度较为接近,所以在本实验中,线性回归模型与指数模型的符合程度较高。因此,低于 20℃和高于 27℃的温度条件下的发育有待于今后作进一步的研究。实际繁殖天敌时,根据情况一般也会在适当的温度范围内进行,本研究应该完全能用于指导大规模的人工繁殖白蜡吉丁肿腿蜂的实践。

目前仅对该蜂的基本生物学特性和行为学习性、生态学进行了初步研究,今后还需要深入开展研究的内容包括:进一步开展繁蜂替代寄主的筛选,寄主的保存方法,蜂种的最佳贮藏温湿度条件和贮藏时间,蜂种的复壮,对一些主要蛀干害虫的寄生能力,在我国的适生区域的评估,成蜂在林间的扩散机制和速度,林间放蜂技术和林间防治效果的研究等。

参 考 文 献 (References)

Haack RA, Jendek E, Liu HP, Marchant RK, Petrice T, Poland MT, Ye H, 2002. The emerald ash borer: a new exotic pest in North America. *Newsletter of Michigan Entomological Society*, 47(3-4): 1-5

Chen ZX, Xu XS, 1997. Key to Exercises in SAS Program of Biostatistics. Beijing: Computer Centre of Chinese Academy of Agricultural Sciences. 38-40, 117-123. [陈子星, 徐夕水, 1997. 生物统计 SAS 程序题解. 北京:中国农业科学院计算中心. 38-40, 117-123]

Nanjing Agricultural College, 1985. Insect Ecology and Pest Prediction. Beijing: Agriculture Press. 320-324. [南京农学院,1985. 昆虫生态及预测预报. 北京:农业出版社, 320-324]

Wang XY, 2005. Biology of the Emerald Ash Borer and Its Biological Control. Beijing: Postdoctoral Research Report, Chinese Academy of Forestry. [王小艺,2005. 白蜡窄吉丁的生物学及其生物防治研究. 北京:中国林业科学研究院博士后研究工作报告]

Wei X, Reardon D, Wu Y, Sun JH, 2004. Emerald ash borer, *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae), in China: a review and distribution survey. *Acta Entomol. Sin.*, 47(5): 679-685. [魏霞,Reardon D, 吴云,孙江华, 2005. 白蜡窄吉丁虫在中国的研究现状与分布调查. 昆虫学报, 47(5): 679-685]

Xiao GR, 1992. Forest Insects of China. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House. 1 262-1 264. [萧刚柔, 1992. 中国森林昆虫(第二版). 北京:中国林业和出版社. 1 262-1 264]

Yang ZQ, 2000. A study on effective accumulated temperature and threshold temperature for development of *Chouioia cunea* Yang (Hymenoptera: Eulophidae). *Scientia Silvae Sinicae*, 36(6): 119-122. [杨忠岐, 2000. 白蛾周氏啮小蜂的有效积温及发育起点温度研究. 林业科学, 36(6): 119-122]

Yang ZQ, 2004. Advance in bio-control researches of the important forest insect pests with natural enemies in China. *Chinese Journal of Biological Control*, 20(4): 221-227. [杨忠岐, 2004. 利用天敌昆虫控制我国重大林木害虫研究进展. 中国生物防治, 20(4): 221-227]

Zhao TH, Gao RT, Liu HP, Bauer LS, Sun LQ, 2005. Host range of emerald ash borer, *Agrilus planipennis* Fairmaire, its damage and the countermeasures. *Acta Entomol. Sin.*, 48(4): 594-599. [赵同海, 高瑞桐, Liu HP, Bauer LS, 孙龙强, 2005. 花曲柳窄吉丁的寄主植物范围、危害和防治对策. 昆虫学报, 48(4): 594-599]

Zhou X, Li SP, Huang GD, Ma ZL, Zhao SL, 2006. A study on threshold temperature and effective accumulated temperature for the development of *Tetrastichus brontispae* Ferriere (Hymenoptera: Eulophidae). *Natural Enemies of Insects*, 28(3): 8-12. [周祥, 李世平, 黄光斗, 马子龙, 赵松林, 2006. 椰心叶甲啮小蜂发育起点温度和有效积温研究. 昆虫天敌, 28(3): 8-12]

Zhou ZJ, Yang W, Zeng CH, Yang DW, Ye WJ, 1997. A preliminary study on the bionomics of *Scleroderma sichuanensis* (Hymenoptera, Bethylidae). *Scientia Silvae Sinicae*, 33(5): 475-480. [周祖基, 杨伟, 曾垂惠, 杨德敏, 叶伟军, 1997. 川硬皮肿腿蜂生物学特性的研究(膜翅目:肿腿蜂科). 林业科学, 33(5): 475-480]

Zhou ZJ, Zeng CH, Yang W, Yang DW, Ye WJ, 1996. Study on environment adaptability of *Scleroderma sichuanensis* (Hymenoptera, Bethylidae). *Forest Pest and Disease*, 3: 4-6. [周祖基, 曾垂惠, 杨伟, 杨德敏, 叶伟军, 1996. 川硬皮肿腿蜂环境适应性的初步研究. 森林病虫通讯, 3: 4-6]

(责任编辑:袁德成)